

疲勞破壞와 破壞力學에 관하여

徐 昌 敏

<慶北大學校 機械工學科 教授>

표 1 용접구조물에 생긴 파괴의 종류

1. 머리 말

1960년 ⁽¹⁾			1970년 ⁽²⁾		
종 류	비율(%)		종 류	건 수	비율(%)
피 로	61		피 로	28	65
취 성 파 괴	15		자 굴	10	23.3
부 식 · 마 멸	3		열 피 로	2	4.7
용 접 파 손	13		용 접 파 손	1	2.3
기 타	8		응 력 부 식 파 손	2	4.7

구조물 및 기기는 각각의 기능·구조·사용환경·온도영향에 의하여 파괴손상이 발생하는데 그 종류와 형식은 다종 다양하지만, 실구조물에 가장 높은 빈도로 발생하는 것은 피로균열손상이다. 일본 내에서 실시된 조사에 의하면, 건설기계, 운반기계, 제철설비, 선박구조, 내연기관, 압력용기 등 많은 분야의 예가 조사되어 표 1과 같이 원인별로 분류되어 있다. 즉 다종 다양한 종류의 파괴 중에서 피로파괴가 압도적으로 많으며, 또 파손 및 파괴원인의 대부분을 차지하고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 피로파괴는 항공기, 자동차를 위시한 기계부품, 압력용기, 배관, 와이어, 로우프 등 각종의 집합부 등에 생긴다. 이러한 구조물 및 기계의 손상과 파괴는 경제적 손실은 물론 인명의 손실을 초래할 뿐만 아니라 정신적 충격으로 인한 공포증을 유발하기도 한다. 때문에 많은 연구자들의 끊임없는 노력으로 이러한 파괴의 대책과 방지책이 검토되어 점차 해결되는 단계에 이르게 되었다.

그러나 대량생산화, 대량수송화, 대량저장화, 고속화, 에너지 절약화 등 변천하는 시대의 흐름에 따른 혁신적인 요구에 호응하기 위한 구조물 및 기기의 대형화나 고성능화에 대한 문제나 새로운 환경의 적응 문제 등에 봉착하게 되었다. 따라서 새로운 기술이 개발되어 상기의 요구에 호응하는 특수한 고강도강, 내식재료, 고인성

저온재료를 개발하여 적용시켜 왔지만 새로운 기술, 새로운 조건에 미흡한 경험과 새로운 지식의 결여 등으로 인하여 파괴는 끊이지 않았으며 이에 새로운 문제점을 잉태하였으며, 오랫동안 반성을 함께 하는 시련을 겪지 않을 수 없었다.

따라서 주어진 각 조건과 문제점에 따른 새로운 방법론이 대두되고 각 분야의 지식 축적과 발전에 의하여 각각의 문제를 해결해 왔다. 이와 같은 끊임없는 노력으로 파괴의 사고건수는 나날이 감소되었지만 전체 파괴 중 피로파괴는 줄지 않고 문헌에 따라 60~90%로 분석되어지고 있다. 피로파괴는 “돌연의 파괴”이므로 각종 파괴 중에서 특별히 경계의 대상이 되고 있다.

이에 본고에서는 과거의 특이할 만한 파괴의 예를 들어 파괴역학의 발달과 더불어 확장·적용되어 온 최근의 파괴에 관한 흐름을 알아 보겠다.

2. 역사적으로 대표할 만한 파괴

수많은 파손 및 파괴 중에 가장 특이할 만한

것으로는 다음과 같은 것을 들 수 있다.

(1) 1840년대 유럽에서 많이 생긴 철도의 차축파괴 및 회전축의 피로파괴를 첫째로 들 수 있다. 이 파괴의 방지책을 강구하기 위하여 1850년대에서 1860년대에 걸쳐 A. Wöhler(1819~1914)는 차축의 피로파괴에 관한 체계적인 피로연구를 시도하였으며, 그 결과 S-N 곡선과 피로한도의 개념을 도입함으로써 피로연구의 창시자가 되었다.

(2) 제 2차 세계대전 후인 1940년대에는 많은 선박이 필요하게 되어 용접선의 제작에 박차를 가하게 되었다. 그러나 이 부분에는 노우하우(know-how)의 결여, 자료의 축적이 결여되어서, 제작된 2500척 중 145척은 두 부분으로 파괴되었으며, 또 700척은 큰 손상을 입었다. 이러한 일련의 용접선 파괴는 역사상 취성파괴로는 가장 유명한 것이 되었다.

(3) 1954년에는 세계 최초의 제트 여객기인 Comet기가 항복응력의 1/3의 응력하에서 설계되었지만, 비행시험 후 4일 뒤 지중해상에서 파괴되었다. 이때 1대의 비행기가 25만개의 破片으로 분리파괴 되었다 한다. 이것은 응력집중이 큰, 직각으로 설계된 機室의 창문들의 모서리에서 많은 피로균열이 동시에 발생·성장된 결과로 축적되며 피로파괴의 연구사상 특필된 사고로 되었다.

(4) 1954년 이후에는 미국에서 많은 原子力發電設備가 가동 되었으며, 각 발전소에서는 발전기, 증기터어빈 등의 파괴사고가 빈번히 발생하였다. 이중 항복응력의 30%로 설계된 대형로우터(약 45톤)의 회전파괴사고가 발생하여 1958년부터는 파괴역학의 적용여부에 대하여 논의되었다.

(5) 1958년부터 미소양국이 宇宙開發 경쟁시대에 돌입하였으니 일련의 우주로켓 파괴사고, 즉 로켓의 추진기가 발사 직후에 공중에서 대폭발을 일으킨 경우나, 超強力鋼의 원통이 대단히 낮은 응력 하에서 파괴된 경우가 생기기 시작하였다. 따라서 이러한 사고해석에 파괴역학이 도입되기 시작하였다.

(6) 1969년에 있었던 高度의 기술의 총합체이며 高價인 F-111 전술비행기의 추락사고가 유명하다. 이것은 비행기의 날개 피벗(wing pivot)에 사용된 인장강도 154kg/mm²인 재료(D6AC)의 단조과정 중에 생긴 것으로 추적되는 작은 표면결함이 문제가 되었다.

이상과 같은 특이한 피로파괴 및 취성파괴의 예를 포함하여 그 취급된 역사를 대략적으로 간추려 보면 표 2와 같다. 이중 중전의 피로강도만을 취급하던 피로파괴를 균열의 발생·성장과정으로 취급한 피로균열의 연구도 약 50년 이상 이 된다. 그리고 취성파괴를 100년 이상으로 추정하는 경우도 있다.

표 2 파괴의 종류와 역사

파괴의 종류	년도 수
피로파괴	120
취성파괴	100
피로균열	50
응력부식파괴	70
부식피로	60

이상과 같이 빈번히 속출된 파괴사고를 방지하기 위하여 많은 연구가 수행되었으며 각 문제점을 처리할 새로운 기술과 개념을 개발·적용함으로써 현실적인 사회의 요구를 충족시켜 왔다. 이러한 일련의 연구 중에 본 고와 연관이 있는 중요한 사항만을 간추려 보면 다음과 같다.

(1) 1850년대~1860년대에는 A. Wöhler의 S-N_f 곡선과 피로한도의 개념을 도입하였고,

(2) 1920년 A.A. Griffith가 유리의 安定論的 에너지 파괴론을 발표하였다.

(3) (2)의 발표 후 여러 학자들의 많은 연구를 거쳐, 1946~1957년도에는 G.R. Irwin이 응력확대계수 K, 균열전파에너지 e_g 및 켈플라이언스란 해석의 파라미터를 발표 함으로써 취성파괴를 위시한 파괴해석을 체계적으로 분석할 수 있는 파괴역학의 체계를 구축하였다.

(4) 이 이후 파괴역학의 적용대상이 크게 확장된 중 1963년 Paris-Erdogon이 식 (1)과

◆ 解 說

같은 疲勞의 m 승법칙을 제안함으로써 定性的 解析에만 국한된 종전의 피로파괴는 定量的 解析이 가능하게 되었다. 따라서 식 (1)을 사용하므로

$$da/dN=C(\Delta K)^m, \Delta K=\Delta\sigma\sqrt{\pi af}(a) \quad (1)$$

단 da/dN : 균열성장속도

ΔK : 응력확대계수범위

$\Delta\sigma$: 응력진폭

a : 피로균열의 길이

$f(a)$: 수정계수

c, m : 재료상수 (m 은 재료에 따라 1~7)

피로파괴 및 피로균열의 문제 해결에 중요한 열쇠를 찾게 되었다. 이와 같이 피로에 관한 연구는 최근 현저한 발전·진보를 보였고 파괴역학적 수법 및 유한요소법 등의 응력해석법이 널리 도입되었다. 이러한 성과는 실구조물의 피로설계, 안전관리, 안전성 평가 등에 응용되어 왔다.

(5) 1968년에는 J.R. Rice가 J -積分을 제안하므로 韌性域에서의 균열문제를 해결하는 길이 열리게 되었고,

(6) 1971년에 W. Elber가 필로균열의 실제 성장은 균열開口에 관련된다는 유효응력확대계수 K_{eff} 를 제안하므로 平均應力의 효과를 통일적으로 정리가능하게 되었다.

이와 같이 피로파괴에 파괴역학이 확대적용되므로 da/dN 와 파면의 스트라이에이션 간격 및 균열선단개구와의 관계, 응력비, 잔류응력, 응력집중율의 영향 등이 연구되었다. 특히 실제적인 피로균열의 성장거동은 개구레벨이상의 하중에만 의존한다는 유효응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 의 유효성이 널리 입증되었다. 한편 피로균열성장의 하한계 응력확대계수 범위 ΔK_{th} , 하한계 유효응력확대계수 범위 $\Delta K_{th, eff}$ 하한계 응력 및 피로한도의 특성 및 상호관계, 하한계에 관한 1사이클의 압축응력의 영향, 複數分布균열의 문제, 피로파괴인성과 정적 파괴인성과의 관계, 탄소성역에서의 피로균열성장 등이 연구의 대상이 되고 있다.

3. 표면결함과 비파괴검사법

앞서 설명한 F-111 비행기의 사고는 실험적인 자료와 실제 사용되는 현장 자료와는 여러가지 차이점이 있으므로, 비파괴검사와 더불어 그 문제점을 알아 본다.

물론 F-111의 날개 피복에 사용된 재료는 검사과정을 거쳐 재료결함의 존재여부를 엄밀히 살폈지만, 이 검사과정 중에 미 발견된 그림 1과 같은 작은표면결함은 설계상에 전연 고려되지 않은 응력집중을 유발시켰다. 즉 점은 타원부분인 표면결함(surface defect)에서 피로균열(밝은 부분으로 나타난 부분)이 성장한 후에 급속도로 균열이 성장·파단되었다. 또한 이 재료는 균열발생이 대단히 어려운 재료임이 피로시험결과에서 언어졌기 때문에 피복부분에 사용되었지만 미발견된 작은 표면결함 때문에 비행기가 추락되었다.

따라서 美空軍에서는 일부의 고장 및 파손이 바로 同機와 같은 高價로된 장비의 機能全體를 마비시키는 것에 크게 자극되어 전면적으로 설계방법을 재검토하게 되었다. 그러므로 균열전파수명에 착안한 FSD(Fail-Safe-Design)에서 균열이 천천히 성장·파괴되는 Slow-Crack-Growth-Design을 거쳐, 결국 DTD(Damage-Tolerance-Design) 방법을 채용하였고, 결국 耐空性 規準(Air Worthiness Regulation)을 규정하였다. 이것은 균열발생을 초래하지 않는 것이 제일이지만, 만일 생겨도 안전여유가 충분히 있

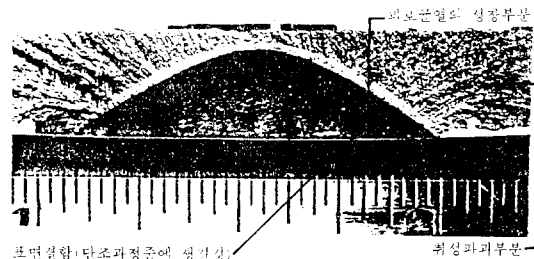


그림 1 F-111의 추락원인이 된 표면결함

도록 보충하는 사고방식의 필요성을 요구하는 것이다.

항공기의 제작에 파괴조정(fracture control)을 하려면 (1) 구조의 용도에 적합한 재료선택과 (2) DTD에 적합한 구조 및 형상을 설계해야 하며, (3) 체계적이고 용이한 비파괴검사법(NDI)의 검사순서를 작성하고 또 (4) 안전운전능력을 설정하므로 소기의 DTD를 하게 된다. 그러나 전술한 바와 같이 문제가 된 작은 표면결함을 실제로 검출하기란 상당히 어렵다.

이와같이 파괴의 주역할을 했던 주균열(main crack)의 발생원인을 분류하면 그림 2와 같이 세가지로 크게 나눌수 있다. 즉 이미 재료에 존재하는 缺陷과 제조과정 중에 생긴 결함이 55% 이상을 차지하며, 그외 운전 중에 생긴 부식공이나 표면흠이 12.8%, 설계불량에서 생기는 결함이 15.8%, 미확인된 것이 16.4%로 분석되고 있다⁽⁴⁾. 즉 파괴의 主要因은 이미 재료상에 존재하는 缺陷들(flaw, defect, scratch)과 제조과정 중에 생긴 결함을 조사·분석하는 것은 대단히 중요한 것이다.

그림 1과 같이 제조과정 중에 생긴 타원형상의 표면결함은 길이 23mm, 깊이 5.7mm이므로 그림 3과 같은 NDI의 검사능률 자료⁽⁵⁾에 의하면 4가지 방법 모두 90% 이상이 될 것이다. 그러나 복잡한 형상 및 넓은 면적으로 구성되는 기기 및 구조물에서는 검사능률이 크게 저하될 수 있으며 또한 검사에 필요한 경비도 클 것이

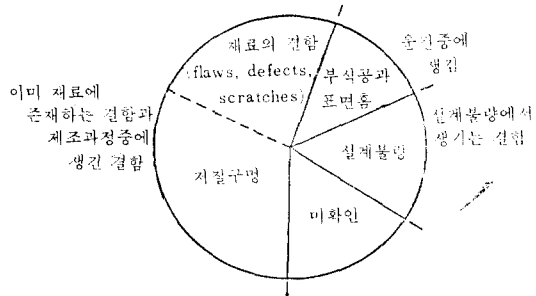


그림 2 주균열의 발생원인에 따른 분류

다. 그 결과의 한 예가 F-111의 경우도 포함될 것이다. 따라서 NDI라도 균열이 적을 때는 검출 불가능하며 또 검사자체가 가능한 부분과 불가능한 부분이 있을 것이다. 이와 더불어 경제적이고 안전하게 운전하기 위하여 각 부품에 따른 균열재의 殘存壽命, 複數의 균열 안전성장의 시간차와 부분적 보수·교환을 이용한 全機器 및 부품의 동시파괴를 방지함이 바람직하다. 즉 피로균열이 발생하지 않는 것이 좋겠지만 만일의 경우 생겨도 안전한 여유가 보증되는 한도내의 서서히 성장됨이 요망될 것이며, 이 성장과정 중에 균열이 검출됨이 또한 유리할 것이다.

그리고 최종적인 불안정성파괴 방지에는 파괴인성치 K_{Ic} 기준이 채용되어 순간적인 파괴를 지연시킴이 필요하다. 따라서 최근 재료의 파괴인성을 조사하기 위하여 방대한 연구가 진척되

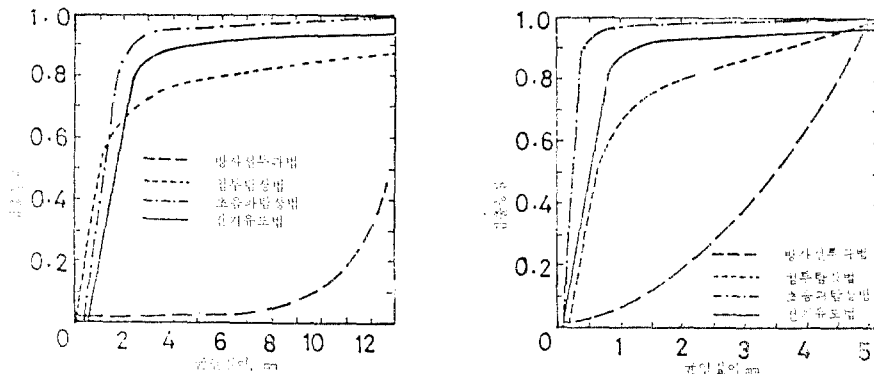


그림 3 비파괴검사법에 의한 검사능률의 변화

◆ 解 說

있으며, 표면결합에서 피로균열을 성장시킨 CT (compact tension) 시험편 및 3점 굽힘시험편이 표준적으로 널리 이용되고 있다. 이와같이 대다수의 파괴는 피로균열의 성장 이후에 파괴되므로, 실구조물의 파괴분석에서 피로파괴가 높은 비율을 차지하는 원인 중의 하나일 것이다.

4. 종래의 설계방법

종래의 설계방법을 크게 나누면 다음의 두 가지로 구분할 수 있다. 즉

- (1) 균열의 발생수명에 착안한 설계 (Safe-Life-Design; SLD)
- (2) 균열의 성장수명에 착안한 설계 (Fail-Safe-Design; FSD)

SLD는 平滑材상의 미소한 균열의 발생이 바로 기기 및 구조물의 중대한 손상 혹은 기능장애를 초래하는 정밀한 기계 또는 중요한 부품의 설계에 응용된다. 따라서 부재에 균열 혹은 유사균열을 포함하지 않는다고 생각하기 때문에 새로운 균열이 발생하기까지의 평활재의 수명을 해석의 대상으로 한다.

FSD는 구조부재가 미소한 균열 혹은 유사균열을 포함하고 있고, 이 균열이 기기 및 구조물의 운전중에 성장하여 안전상 어떤 한계크기에 달할때 까지의 수명을 해석의 대상으로 하고 있다. 따라서 FSD에 의하여 미공군에서는 DTD가 채용되었으며, 壓力容器設計에는 LBB(Leak Before Burst)가 널리 사용되고 있어 재료선택, 검사, 보수, 사고해석 등에 적용되고 있다. 또한 고객의 요구, 관청의 지도에 의하여 결함과 피로균열을 고려한 검사와 安全性 解析 등에 파괴역학이 널리 적용되고 있다. 그러나 LBB는 파괴 이전에 내용물의 유출을 기대하는

원리이므로 Three Miles Island 원자로 유출 사고(1979)로 인하여 오염된 액체의 유출은 또 다른 문제를 야기시켰으므로 이 방법의 재검토를 논하고 있다.

이와 같이 原子爐 壓力容器 등은 피로균열 성장과 사용 중 검사와 보수를 조합하고 있지만

設計에는 평활재의 저사이클 피로개념을 사용하고, 健全性 評價 및 檢查시에는 균열재의 파괴역학적 개념을 적용시켜 왔다. 따라서 구조물·기기의 피로파괴의 방지, 안전성을 확보키 위하여 方法論, 實驗法이 다른 두가지의 어프로우치를 융합하여 피로파괴의 전 과정을 해명하고 통일적인 운용을 할 필요가 있다. 필자는 이와 같은 두가지의 설계방법의 중간부분을 연결할 수 있는 설계법의 기초적 자료를 축적하는 목적하에 연구를 수행하여 표 3과 같이 종래의 파괴역학적 연구와 비교하였다.

즉 종래의 파괴역학적인 연구는 선형파괴역학(LEFM)이 적용되는 저탄성역의 범위로 單一한 大型貫通균열이 주 대상이 되었다. 그러나 실구조물에서 문제가 되는 것은 비교적 크기가 작고 또 그 수가 많은 表面균열의 경우가 많다. 또한 複數의 많은 分布균열은 고온설계에서 더욱 그 중요성이 인정되고 있다. 그러므로 평활재의 저사이클피로와 ΔK 의존성의 피로균열성장과의 整合性이 없는 것을 들수 있지만 이 벽을 넘어서면 설계면에서의 파괴역학의 도입에 일보 진보

표 3 종래의 파괴역학적 연구와 필자의 연구

구 분	종래의 파괴역학적 연구	필자의 연구
대상의 균열 형 상	관 통 균 열	표 면 균 열
크 기	대 형 균 열	작고, 微小한 균열
개 수	단 일 균 열	복수(分布) 균열
시 험 편	노치가 있는 시험편	평활 시험편 작은 결함 시험편
대상이 되는 피로 과정	대형균열의 피로 균열 성장과정 (LEFM)	미소균열의 발생, 분포균열의 간섭, 합체성장과정, 균열면 형상 변화등
부하 하중	應力이 적은 彈性域	應력이 비교적 큰 彈塑性域 크리이프域, 환경(高濕)
재 료	低靱性材가 주됨 (高強力鋼, 高力 알루미늄 合金등)	高靱性材(靱鋼, 스테인리스 강)

표 4 파괴역학의 분류와 응용범위

大分類	中分類	小分類	파라미터 또는 手法	적용되는 파괴양식
確定論的 破壊力學	파괴의 靜 力學	선형파괴 역학	K : 應力擴大係數 ΔK : 應力擴大係數 범위 y : 에너지 방출율	취성파괴, 高사이클피로 환경 파괴 (SCC) 복합재료의 파괴
		彈塑性破壊力學	J : J 積分 J' : 수정 J 積分(C) COD: 균열開口變位 COA: 균열開口角 T: 티어계수 (tear modulus)	大規模降伏破壞 低사이클피로 균열안정성장 크리이프파괴
		延性破壊力學		延성파괴 (보이드성장·합체등)
	파괴의 動 力學	線形破壞動力學	$K(t)$: 動的應力擴大係數 $K(t, v)$: 동균열응력확대 계수	충격파괴, 고속파괴 균열구속
		彈塑性파괴동역학		
確率論的 破壊力學	파괴의 정 역학	선형파괴역학 탄소성파괴역학	K , 와이불 分布 몬테 카를로 分布 확률 과정론	취성재료의 파괴 (결함크기, 인성취, 재료특성의 분산과 파 괴확률), 지연파괴

할수 있을 것이다. 따라서 高應力, 微小균열의 문제, 分布균열의 성장문제에 있어 한가지 중요한 역할도 여기에 있을 것이다.

5. 파괴역학의 분류와 적용대상

파괴역학의 적용대상 및 확장은 대단히 광범위하고 나날이 그 확장범위가 넓어지고 있다. 즉 복합재료, 플라스틱, 세라믹 등의 재료 뿐만 아니라 信賴性 評價法도 응용되고 있다. 표 4는 파괴역학의 분류와 응용범위를 나타내고 있다⁽⁶⁾.

즉 종래의 선형파괴역학에서 J 적분을 매개체로 사용한 彈塑性破壊力學과 연성파괴역학의 범위를 파괴의 정역학으로 분류하고, $K(t)$ 를 매개체로 사용하는 선형파괴동역학과 탄소성파괴동역학을 파괴의 동역학으로 분류하고 최근 연구가 진행되고 있다. 파괴의 정역학과 동역학을 확정론적인 파괴역학으로 분류하고, 와이불 (Weibull)

분포와 몬테 카를로 (Monte Carlo) 분포 등의 확률론을 이용한 것을 확률론적 파괴역학이라 하여 최근 전자계산기의 발달과 NDI에 의하여 활발해지고 있다.

이와 같이 파괴역학은 NDI, 화상처리, 신뢰성 공학, 전자계산기 등의 상호협력하에 고온, 응집, 복합재료, 취성재료, 동적파괴, 박판재료, 노화현상 및 실험응력해석 등, 그 적용대상은 나날이 방대해지고 유용하게 응용되고 있다. 따라서 고온피로 및 크리이프, 크리이프와 피로의 상호작용, 환경피로, 파괴인성, 충격피로, 경계요소법 (BEM)에 의한 해석, 세라믹의 파괴 신재료의 피로강도 등 광범위한 영역이 최근 연구의 대상이 되고 있다.

6. 맺음 말

최근에 공업, 기술의 발달에 따라 새로운 환경과 상황의 발생으로, 우리들은 새로운 균열, 파손 및 파괴문제 등에 당면하고 있다. 이와 같

◆ 解 說

이 변천하는 사회의 욕구를 만족시키고 또 인명과 경제적 손실을 막기 위해서는 종래의 재료시험법 및 금속학 등의 기초학문에다 파괴역학, 파면해석, 비파괴검사법 등을 응용시켜 가며 나날이 그 확대되는 폭을 넓히고 있다. 따라서 기기 및 구조물의 파손 및 파괴를 방지하기 위해서는 다음과 같은 사항이 요구될 것이다. (1) 파괴와 방지책의 자료수집, (2) 파괴해석의 확립, (3) 각종기기 및 구조물의 파괴양식의 통제화, (4) 각 조건에 따른 기초적인 데이터와 노우 하우를 축적, (5) 이를 응용·적용시키는 방법론의 체계화가 필요한 것이다.

참 고 문 헌

(1) Ohta, S. "Fatigue of Worked Metallic Member and Structure", J. of JSME, Vol.

87, pp.1024, 1984

(2) 内野 "溶接構造物の疲労破壊とその防止, 日本經營幹部 Semina Text「構造物の破損破壊防止」, 1971

(3) Dieter, G.E. "Mechanical Metallurgy" 2nd Edition, McGraw-Hill, Inc. pp. 403, 1976

(4) Wood, H. A. "Application of Fracture Mechanics to Aircraft Structural Safety", Engineering Fract. Mechanics, Vol. 7 pp. 557~564, 1975

(5) Rummel, W.D. et. al, "The Detection of Fatigue Cracks by NDI Testing Methods", NASA Contractor Report, CR-2369, 1974

(6) 生研세미나교재, 104, 東京大學 生産技術研究所, pp.14, 1985



제 6 차 국제 압력용기기술 학술대회

(Sixth International Conference on Pressure Vessel Technology)

일 시 : 1988년 9월 11일~15일 (5일간)

장 소 : 중공 빼이징

초록마감 : 1987년 2월 2일

제 출 처 : Prof. Takeshi Kanazawa, President,
High Pressure Institute of Japan,
5th Floor, Sympo-Sakuma Building,
1-11 Kanda Sakuma-cho,
Chiyoda-ku, Tokyo 101, JAPAN

문 의 처 : 본 학회 사무국 (02-879-0186, 0187)